

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Návrh konstrukce a testování domu do seismických oblastí

Design and Testing of a House for Seismic Areas

Student:

Bc. Petr Matějek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Matějek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství |
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Návrh konstrukce a testování domu do seismických oblastí**
Design and Testing of a House for Seismic Areas
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte průzkum řešené problematiky zejména z hlediska výskytu seismických oblastí, charakteru zatížení domu seismickými otřesy a stávajících řešení problému.
2. Navrhněte vhodnou konstrukci provedení domu na základě moderních materiálů.
3. Proveďte pevnostní kontrolu nosné konstrukce navrženého domu z hlediska jeho namáhání při zemětřesení.
4. Navrhněte konstrukci testovacího zařízení pro simulaci zemětřesení.
5. Proveďte potřebné kinematické a pevnostní výpočty tohoto zařízení.
6. Zhotovte dokumentaci v rozsahu podle pokynů vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

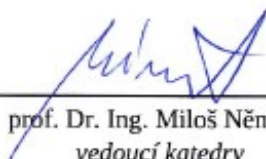
Boháček, F. *Části a mechanismy strojů I a II*. Brno: VUT Brno, 1987.
Bolek, A. a kol. *Části strojů - svazek 1. a 2*. Praha: SNTL, 1990.
Němec, J. a kol. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1989.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2019


.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona § č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2019

.....
podpis studenta

Bc. Petr Matějka

Štěplovec 30

747 74

Anotace

MATĚJEK, P. *Návrh konstrukce a testování domu do seismických oblastí: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismy strojů, 2019, 39 s. Vedoucí práce Folta, Z.

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce a testováním domu do seismických oblastí. Ve třetí kapitole je popsána problematika zemětřesení. Poté jsem navrhl dvě varianty konstrukce domu a volbu jejich materiálu. Po výběru jedné z variant domu jsem provedl pevnostní analýzu pomocí MKP výpočtu, při které jsem zjistil nedostatky konstrukce. Tyto nedostatky jsem následně experimentálně eliminoval. Pro návrh testovacího zařízení jsem z normy ČSN EN 1998-1 dostal vstupní parametry pro návrh testovacího stroje, který byl poté pomocí MKP výpočtu zkontrolován.

Annotation

MATĚJEK, P. *Design and Construction of a House in Seismic Areas: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2019, 39 pp. Thesis supervisor Folta, Z.

This thesis deals with a design of the construction and testing the house into seismic areas. The third chapter describes the issue of earthquakes. Moreover, I designed two variants of the house construction and the choice of material. After selecting one of the house variants, I performed a stress analysis using the FEM calculation, in which I found deficiencies in the construction. I subsequently eliminated these shortcomings experimentally. For the design of the test equipment I received the input parameters for the design of a testing machine from the ČSN EN 1998-1 standard, which was then checked using the FEM calculation.

1 Úvod

Cílem diplomové práce je dle zadání Návrh konstrukce a testování domu do seismických oblastí. Snahou bude popsat vznik zemětřesení, jeho mechanismus, klasifikace a důsledky. Dále se budu zabývat podrobněji oblastmi postiženými různými typy zemětřesení a zaměřím se na řešení konstrukce staveb v jednotlivých regionech. Dalším krokem jsou variantní řešení návrhu konstrukce domu a jejich zhodnocení, včetně průzkumu a volby materiálu. Z důvodu nedostatečných informací o vlastnostech materiálu jsem byl nucen provést tahovou zkoušku, díky které jsem zjistil požadované vlastnosti. Po vyhodnocení tahové zkoušky jsem provedl modální analýzu, při které jsem zjistil nedostatky mého návrhu a konstrukci postupně zdokonaloval. Poté jsem přistoupil k návrhu konstrukce testovacího zařízení pro simulaci zemětřesení a navrhnul různá provedení, k čemuž jsem pomocí normy ČSN EN 1998-1 zjistil vstupní parametry. Poté bylo zařízení navrženo a pevnostně zkontrolováno. Podle pokynů vedoucího práce jsem zhotovil dokumentaci v doporučeném rozsahu.

2 Cíle

Obsahem diplomové práce je návrh konstrukce a testování domu. V průběhu řešení se ukázalo vhodné provést z důvodu nedostatku informací o vlastnostech materiálu tahovou zkoušku a dle ČSN EN 1998-1 zjistit vstupní parametry pro návrh testovacího stroje. Proto jsme, spolu s vedoucím diplomové práce, provedli úpravu obsahu a cílů diplomové práce následovně:

1. Provést průzkum řešené problematiky zejména z hlediska výskytu seismických oblastí, charakteru zatížení domu seismickými otřesy a stávajících (následných) řešení problému.
2. Navrhnout variantní řešení konstrukce domu.
3. Provést tahovou zkoušku zvoleného materiálu.
4. Provést pevnostní kontrolu nosné konstrukce navrženého domu z hlediska jeho namáhání zemětřesení.
5. Navrhnout testovací stroj pro simulaci zemětřesení.
6. Provést potřebné kinematické a pevnostní výpočty zařízení.
7. Zhotovit dokumentaci v rozsahu podle pokynu vedoucího práce.

3 Popis problematiky

3.1 Vznik a podstata zemětřesení

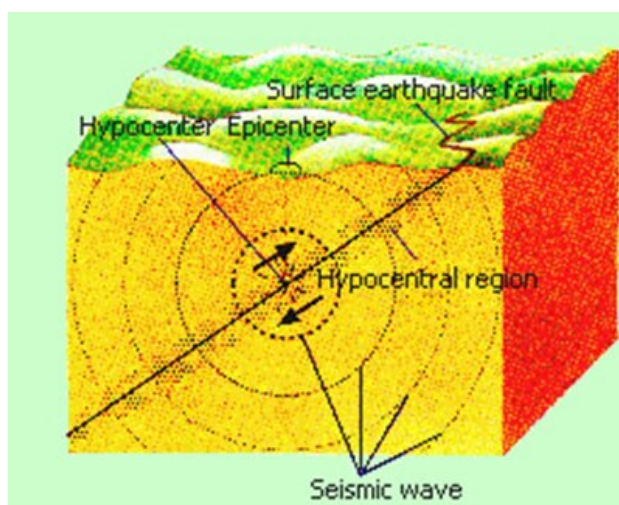
Zemětřesení představuje řadu otřesů, které se šíří ve vlnách zemským nitrem nebo podél povrchu zemské kůry. Otřesy vznikají na základě náhlého uvolnění energie v zemském tělese. Energie se pod povrchem hromadí v důsledku silových pochodů, které v horninách zemské kůry a pláště neustále vytváří napětové stavy. V případě náhlého nashromáždění této energie, definujeme zemětřesení jako „soubor krátkodobých pohybů reprezentující proces při změně napětového stavu hornin“.³

Litosférické desky, které vytváří povrch Země, dosahují do hloubek maximálně pár desítek km. Desky se proti sobě mohou pohybovat rychlostí několik centimetrů za rok, což vede k hromadění napětí především na styčných plochách. Jakmile dojde k překročení pevnosti hornin, dojde k uvolnění výše zmíněného napětí a k rychlým posuvům, což se projeví jako zemětřesení. Část nahromaděné deformační energie se spotřebuje k porušení horniny

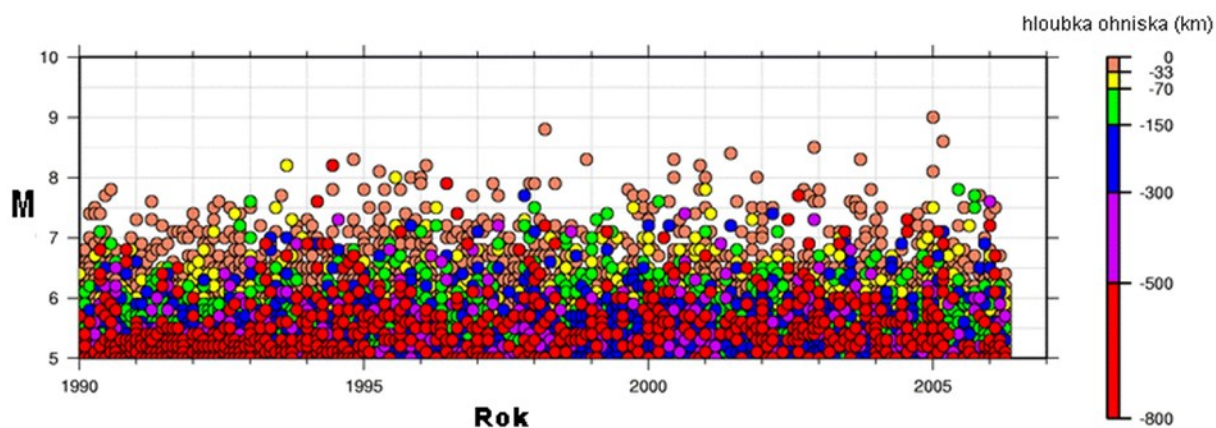
a k posunu bloků podél trhliny a zbylá část energie je vyzářena do okolí v podobě seismických vln.³

Zemětřesení může nabývat různé intenzity. Obecně platí fakt, že mělká zemětřesení často souvisí s pohyby podél zlomů v zemské kůře. K intenzivnějším otřesům dochází ve větších hloubkách v zónách podsouvání ker zemské kůry. Pásma, která jsou spojena s nejčetnějším výskytem zemětřesení, jsou rozložena podél okrajů ker zemské kůry, a tudíž ukazují na souvislost mezi těmito pásmy a kernou tektonikou. Příkladem pásma spojeného s častým výskytem zemětřesení je tzv. ohňový prsten kolem Tichého oceánu. Jiné takové pásmo se táhne napříč Čínou, podél Himálaje, přes Írán do severního a jižního Středomoří. V některých oblastech se zemětřesení vyskytují poměrně často a ta nejsilnější z nich se mohou narušovat horniny nebo se mohou podílet na změnách vzhledu georeliéfu. I když jedno zemětřesení ročně má v dlouhodobém průměru katastrofický průběh, přesto jej v geomorfologii řadíme ke katastrofickým jevům.³

Místo vzniku zemětřesení se nazývá ohnisko (hypocentrum) odkud se šíří seizmické vlny. Ohnisko není prostorově omezeno a může dosahovat velkých rozměrů (dlouhá zlomová území, subdukční zóny). Jeho kolmý průmět na zemském povrchu se nazývá epicentrum. Je to místo na povrchu, které je nejbližší k oblasti otřesů. Vzdálenost mezi epicentrem a hypocentrem udává hloubku ohniska. Intenzita zemětřesení klesá se vzdáleností od epicentra.³



Obr. 1 Základní pojmy zemětřesení.¹³



Obr. 2 Graf zemětřesení s $M > 5$ od roku 1990

Obr. 2: Graf zemětřesení (magnitudo 5 a více) na celém světě od roku 1990. Barva rozlišuje hloubku ohniska, na ose y je uvedena velikost otřesů. Z grafu je patrné, že ničivější zemětřesení mají tendenci vznikat v menších hloubkách.²

Tři základní atributy, kterými je charakterizováno zemětřesení, jsou velikost, intenzita a síla (magnitudo).

Intenzita zemětřesení je veličina, která charakterizuje jeho účinky na základě makroseismických projevů. Jde o projevy subjektivně pozorované lidmi v krajině (ničení staveb, sesuvy, pukliny v povrchu apod.). Velikost zemětřesení udává množství energie uvolněné otřesy. Je to objektivní veličina vycházející z měření mikroseismických účinků. Jde o účinky zaznamenávané speciálními přístroji, seismografy.²



Obr. 3 Zlom v Kalifornii

Obr. 3 Zlom San Andreas v Kalifornii na západě USA. Tato zlomová oblast je známá díky častým a ničivým tektonickým zemětřesením.¹

Intenzita zemětřesení je hodnocena podle jeho účinků na povrchu. Stupnice MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg) užívaná v Evropě má 12 stupňů. Měření je empirické – podle vnímání lidí a poruch staveb. Stupnice MSK – 64 (Medvědév, Sponheuer, Kárník) (ČSN 73 0036) se

používá vy východní Evropě. Pro tuto stupnici platí, že hodnoty zrychlení jsou 4 – 5x větší než u stupnice MCS.¹⁴

Stručný popis makroseismické stupnice MSK - 64

- I. Zaznamenané pouze přístroji.
- II. Pozorován citlivými osobami v klidu, zvláště ve vyšších patrech budov.
- III. Část obyvatelstva uvnitř budov je pociťuje jako slabý otřes, venku jen výjimečně. Otřesy se podobají projíždění nákladního auta. Zavěšené předměty se mohou kývat.
- IV. Lze pozorovat i mimo budovy, spící se většinou probudí. Otřesy připomínají projíždění těžkých nákladních vozidel. Okna dveře a nádobí drnčí, zavěšené předměty se kývají.
- V. Pozoruje jej i venku mnoho lidí, budovy se chvějí, lehčí předměty se posunují, kyvadlové hodiny se zastavují, dveře a okna se zavírají a otvírají.
- VI. Pociťeno většinou lidí uvnitř i venku, mnoho lidí s úlekem vybíhá ven, ztrácejí rovnováhu, i těžký nábytek se posunuje, rozezvučí se zvony, objevují se trhliny v omítce.
- VII. Pociťují i lidé jedoucí v motorových vozidlech, objevují se trhliny ve zdech, špatně založené budovy se řítí, vodní plochy se vlní.
- VIII. Vyvolává zděšení a paniku, velké škody na většině budov, boří se stěny, v půdě se objevují trhliny.
- IX. Všeobecná panika, i u nejkvalitněji postavených budov vznikají trhliny ve zdech, ostatní stavby jsou vážně poškozeny a částečně se hroučí, mohou být ohnuty železniční koleje.
- X. Vážné škody i u budov se speciální konstrukcí, většina budov je zničena, poškozené hráze, mosty, železnice a potrubí.
- XI. Všeobecná katastrofa, všechny druhy budov těžce poškozeny, dochází k sesuvům půdy a řícení skal.
- XII. Dochází ke změně tvárnosti krajiny. Prakticky všechny stavby jsou těžce poškozeny nebo zničeny. Pozorují se horizontální i vertikální posuny podél velkých trhlin.²

Magnitudo (M)

Vyjadřuje velikost zemětřesení a určuje se ze seismometricky maximálních výchylek pohybu půdy při zemětřesení. Tato jednotka byla navržena Japoncem Wadatim. Jednu z magnitudových stupnic vytvořil Charles Francis Richter v roce 1935.⁹

Richterova stupnice

Popisuje velikost zemětřesení právě podle výše zmíněného magnituda. Je založena na množství energie v hypocentru zemětřesení. Udává intenzitu pohybu Země měřenou ve vzdálenosti 100km od epicentra zemětřesení. Je logaritmická a nemá horní hranici.

Richterova stupnice

Magnitudo	Následky
1, 2	Není cítit, lze pouze měřit přístroji
3	Nejmenší hodnota, kterou člověk rozpozná; bez poškození
4	Slabé zemětřesení
5	Slabé poškození budov blízko epicentra
6	Vážné poškození špatně postavených budov
7	Velké poškození budov
8	Téměř úplné zničení

Tab. 1 Magnitudo a následky zemětřesení.²¹

3.2 Druhy zemětřesení

Zemětřesení můžeme klasifikovat z různých hledisek:

3.2.1 Klasifikace zemětřesení podle původu

3.2.1.1 Říťivá zemětřesení

Vznikají řícením stropů různých podzemních dutin. Může se jednat o přírodní útvary (např. krasové jeskyně) nebo o dutiny vytvořené člověkem (opuštěné doly apod.). Tvoří asi 3 % ze všech zemětřesení, mají pouze lokální dosah a mělké hypocentrum., ale škody mohou být fatální.

3.2.1.2 Vulkanická zemětřesení (sopečná)

Jsou vázána na přírodní dráhy vulkanického materiálu. Mohou doprovázet nebo předcházet sopečné erupce. Mají lokální dopad a intenzita nebývá velká. Obvyklý je výskyt otřesů ve skupinách (zemětřesné roje). Tvoří asi 7% všech zemětřesení.

3.2.1.3 Tektonická zemětřesení

Jsou nejčastějším a nejnebezpečnějším typem zemětřesení. Jejich vznik je spojen s poruchami v litosféře (zlomy, subdukce), kde často dochází k náhlým a intenzivním procesům, při kterých se uvolňuje velké množství nahromaděné energie. Prostorový dopad může být obrovský a rozsah postižené oblasti může nabýt rozměrů až stovky km².

3.2.2 Klasifikace zemětřesení podle hloubky ohniska

3.2.2.1 Mělká zemětřesení

Vznikají v zemské kůře a svrchní části pláště v hloubce do 60 km. Spadají sem všechny říťivé, vulkanické a většina tektonických otřesů. Projevují se např. řícením skal, pádem lavin nebo odpalem náloží.

3.2.2.2 Středně hluboká zemětřesení

Vznikají pouze v zemském plášti na okraji litosférických desek. Hloubka hypocentra je od 60 – 300 km.

3.2.2.3 Hluboká zemětřesení

Jsou lokalizována v subdukčních zónách, zvláště v Tichomořské oblasti. Hloubka ohniska je nad 300 km. Podle Kukala (1983,50) bylo nejhlubší světové zemětřesení lokalizováno v Indonésii v roce 1934 s hloubkou ohniska 720 km.

3.2.3 Klasifikace zemětřesení podle oblasti vzniku

3.2.3.1 Kontinentální zemětřesení

Většinou způsobují bezprostřední škody na majetku a ztráty na životech.

3.2.3.2 Podmořské zemětřesení

V případě, že se ohnisko nachází pod mořem, může dojít k vyvolání vlny tsunami. Nejvíce zaznamenaných podmořských zemětřesení je v Pacifiku.

3.3 Mechanismus zemětřesení

Většina zemětřesení se vyskytuje na aktivních zlomech, což jsou oslabené zóny mezi dvěma bloky hornin, které vznikají vysokotlakou metamorfózou. Vyskytují se převážně na okrajích ale i uvnitř litosférických desek. Většina z nich je umístěna pod povrchem Země, ale mohou vystupovat i na povrch. Hloubka zlomu může dosahovat několik metrů, délka zlomu může dosahovat až několik kilometrů. Rychlost pohybu horninových bloků je různá. Podstatou však je, že pokud se horninové bloky zaklíní, kinetická energie se začne akumulovat v podobě potenciální energie. Začne tak docházet k deformaci zaklíněných částí a jejich okolí. Třecí síly mohou být oslabené silikagelem, který získává funkci maziva. Silikagel vzniká reakcí oxidu křemičitého s vodou. Tření v horninových blocích klesá se zvyšujícím se obsahem oxidu křemičitého.

V průběhu kumulace potenciální energie dochází k fyzikálním a chemickým změnám na zlomové ploše.

Každá hornina je charakterizována svoji mezí pevnosti. Pokud je mez pevnosti překročena vlivem zvyšujícího se počtu mikrotrhlin, dochází ke vzniku trhliny. Takové mikrotrhliny vznikají uvolňováním a tlakovým nasycením zaklesnutých částí. Z toho vyplývá, že spouštěcím faktorem zemětřesení je voda.

Napětí roste, zaklíněné části se dostanou do nové polohy a dochází ke vzniku seismických vln po celé délce porušené oblasti, která se stává ohniskem zemětřesení. Hypocentrum vzniká v místě trhliny. Ve výše uvedené zmínce se kolmý průmět hypocentra na povrch Země označuje jako epicentrum. Rozdíl mezi původní a novou polohou se označuje jako diskontinuita.⁴

V závěru této kapitoly je potřeba ještě zmínit termíny jako jsou dotřesy, předtřesy. Dotřesy jsou slabší zemětřesení přicházející po hlavním silnějším zemětřesení a vznikají v místech, kde je akumulována energie a kde šíření trhliny zastaví. Naopak předtřesy předchází hlavnímu zemětřesení v podobě slabších zemětřesení.

3.4 Seismické vlny

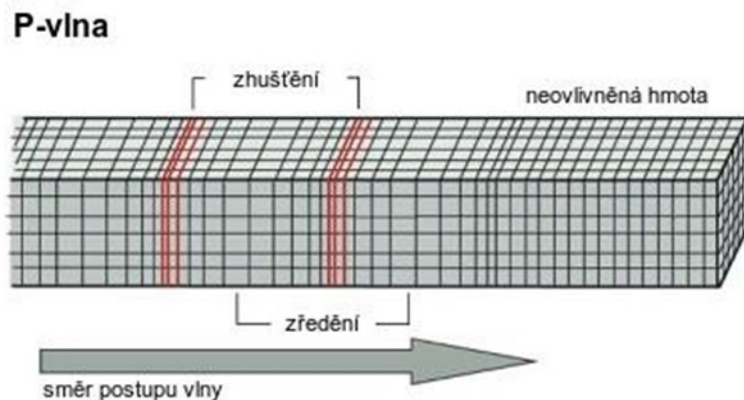
Vznikají uvolněním nashromážděné elastické energie na povrchu nebo uvnitř zemského tělesa. Šíří se do všech stran od místa svého vzniku. Díky poklesu amplitudy pohybu s rostoucí vzdáleností se horniny v určité vzdálenosti od ohniska chovají jako elastické a prostředím se šíří jako elastická deformace (Lowrie, 1997). Intenzita krátkého kmitavého pohybu částic v prostředí, kterým prochází seismická vlna, klesá. Lokality, kam vlnění dospělo, jsou oddělené od míst, která jsou v klidu, tzv. vlnoplocha (čelo vlny). Na vlnoploše se nachází body, které jsou zdrojem nového vlnění a jejího šíření. Nově vzniklé vlnoplochy se navzájem ruší

a zůstanou pouze její části postupující ve směru původní vlnoplochy. Jde o tzv. Huyghensův princip. Směr postupu seismických vln udávají seismické paprsky, které jsou kolmé na vlnoplochy. Rychlost postupu vlnoplochy odpovídá rychlosti šíření seismických vln.¹⁹

Při zemětřesení vzniká několik typů seismických vln lišících se rychlostí. Vlastním pohybem částic a mírou ničivých účinků. Seismické vlny se rozdělují na povrchové a prostorové. Mezi povrchové vlny patří Rayleighovy vlny a Loveovy vlny. Mezi prostorové vlny patří P – vlny a S – vlny.

- **P – vlny (podélné, primární vlny)**

Kmitání částic P - vlny je shodný se směrem šíření P – vlny, jde o periodické zhušťování a zředňování hmoty (obr. 4). Vzhledem k tomu, že se P – vlny mohou šířit ve všech typech skupenství, prochází tak celým zemským tělesem. Patří mezi nejrychlejší typy elastických vln a škody, způsobené tímto typem vln, jsou minimální.

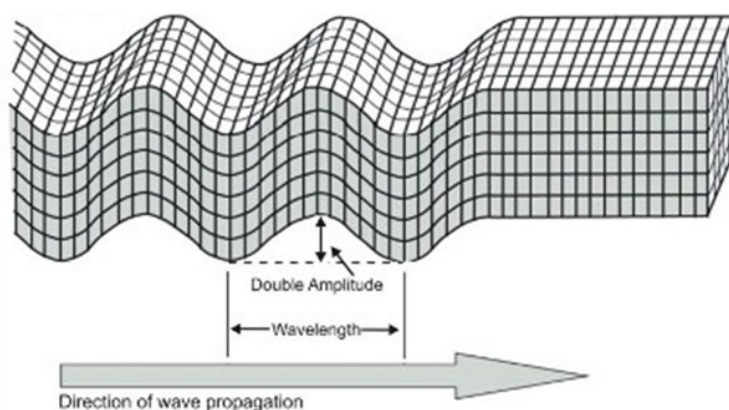


Obr. 4 Podélné sousmické vlnění

Podélné seismické vlnění. Částice kmitají ve směru šíření vlny, dochází k zhušťování a zředění hmoty.⁵

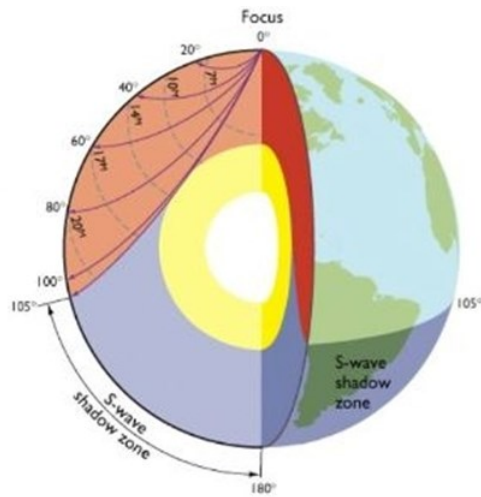
- **S – vlny (příčné, sekundární vlny)**

Kmitání částic se soustřeďuje kolmo na směr šíření vlny v rovině vertikální nebo horizontální. I když jsou S – vlny pomalejší oproti P – vlnám, jejich účinky mohou být fatální. Mohou být příčinou fyzického pohybu zemského povrchu (zřícení staveb). Protože se nešíří v kapalinách a plynech, neprochází tak celým zemským tělesem a tudíž vzniká na opačné straně planety oblast zastínění S – vln za překážkou v podobě kapalného jádra Země (obr. 5). Obrázek dále ukazuje dvě hlavní charakteristiky vlny - vlnovou délku a amplitudu.⁵



Obr. 5 Příčné seismické vlnění.⁵

Oblast zastínění S-vln na opačné straně zeměkoule za překážkou, kterou představuje kapalně jádro Země (obrázek 6).



Obr. 6 Oblast zastínění S-vln.

- **Rayleighovy vlny**

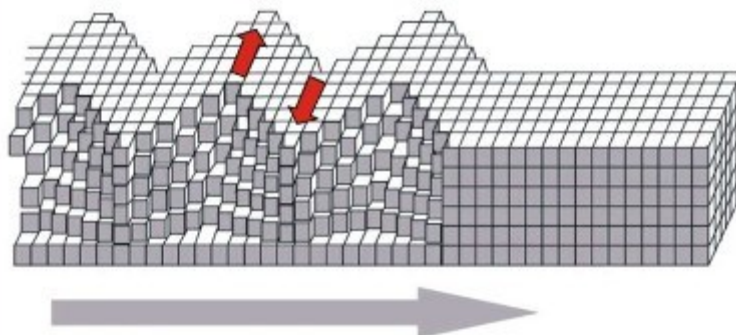
Částice kmitají kolmo na směr vlnění v rovině vertikální a pohybují se po eliptické trajektorii. Lze si je představit jako vlny na vodě.²²

- **Loveovy vlny**

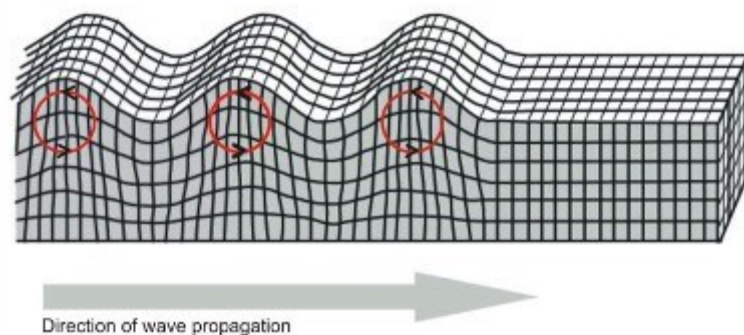
Částice kmitají kolmo na směr vlnění v rovině horizontální. Jsou pomalejší než Rayleighovy vlny.

Surface waves

Love wave

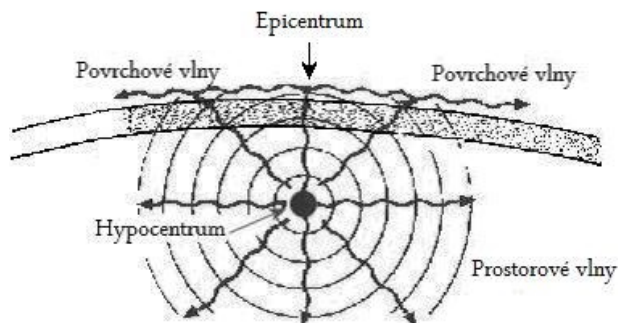


Rayleigh wave



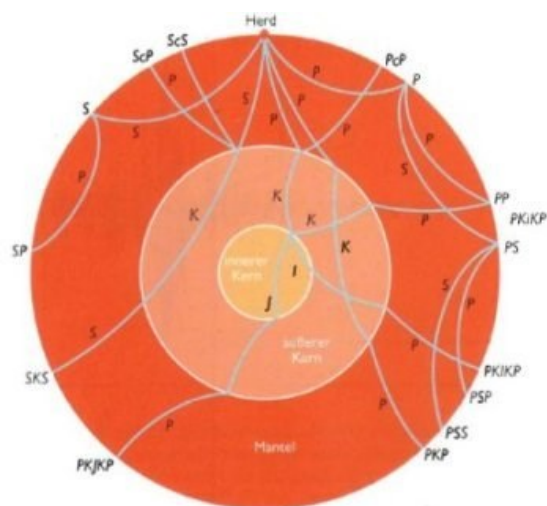
Obr. 7 Povrchové vlny. Vlny Loveovy kmitají v horizontální rovině, vlny Rayleighovy v rovině vertikální kolmo na směr šíření vlny.⁵

Povrchové vlny se šíří jen po zemském povrchu do určité hloubky, jsou pomalejší než prostorové vlny a přináší s sebou maximální rizika. Prostorové vlny se mohou šířit i do nitra zemského tělesa.



Obr. 8 Šíření vln¹⁵

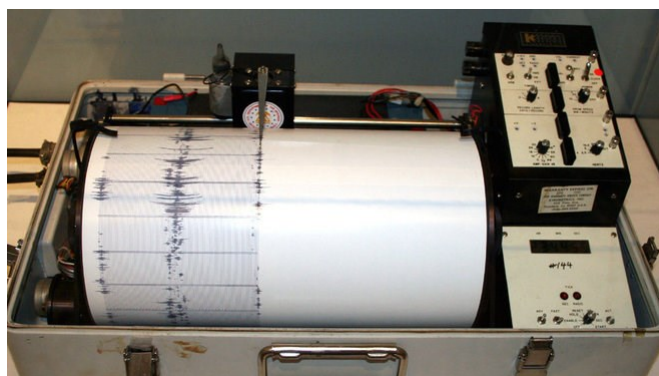
Jakmile vlny prochází zemským tělesem, dochází k jejich vzájemné přeměně, lomu, odrazu nebo refrakci, což závisí především na úhlu dopadu, hustotě prostředí a na rychlosti šíření vlny v něm. Vnitřní prostředí Země není homogenní. Jednotlivé vrstvy mají různé fyzikální vlastnosti, které ovlivňují charakter šíření vln. Následně vzniklé vlny odražené, přeměněné nebo lomené se dál šíří zemským tělesem. Jestliže se hustota v určité vrstvě mění spojitě, vzniká refrakce vlny.



Obr. 9 Průchod seismických vln zemským tělesem, jejich odraz, přeměna, lom a refrakce.¹⁷

3.5 Měření zemětřesení

Seismograf je přístroj, který zaznamenává otřesy půdy, vyvolané zemětřesením, sopečnou činností apod. Skládá se ze seismometru s elektromagnetickými obvody a z analogového nebo digitálního záznamového zařízení.



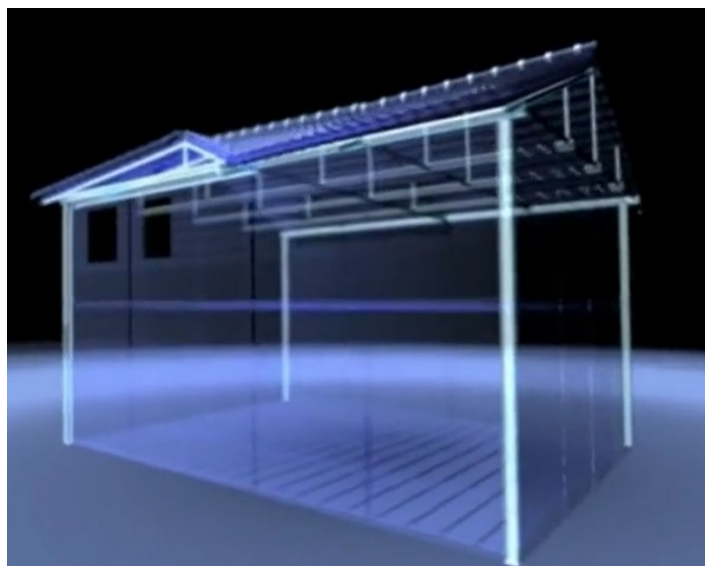
Obr. 10 Moderní seismograf.¹⁸

3.6 Oblasti zasažené silným zemětřesením

Japonsko, Kóbe

K zemětřesení došlo 17. 1. 1995 o magnitudu 7,2. Katastrofa si vyžádala asi 4600 obětí přímo v Kóbe. Při zemětřesení došlo ke zřícení 200 000 budov, došlo ke kolapsu infrastruktury jednoho kilometru dálnice Hanshin a ke zničení 120 km nábreží. V neposlední řadě došlo i k přerušení dodávky elektřiny. Škody takového rozsahu byly důsledkem špatné projekce staveb proti zemětřesení.

Místní domy byly postaveny spíše proti tajfunu. Měly těžkou střechu a štíhlé nosné pilíře. Devět z deseti takových domů při zemětřesení zabíjely.



Obr. 11 Dům v Kóbe

Jižní Chile

Pravděpodobně historicky největší zaznamenané zemětřesení s magnitudem 9,5 zasáhlo oblast jižní Chile 22. května 1960. Při zemětřesení přišlo o život přes 2000 obyvatel, 3000 lidí bylo zraněno a 200 000 lidí zůstalo bez střechy nad hlavou. Otřesy rovněž vyvolaly velké tsunami, které postihlo celou tichomořskou oblast a výbuch sopky Puyehue v Andách.

Místní obyvatelé chtěli zajistit odolnost jejich domů proti zemětřesení tak, že zdi tvořili z pálených nebo nepálených cihel a zpevňovali je jen hliněnou omítkou a maltou. Tyto zdi zpevnili z vnějšku i z vnitřku stavby provazovou sítí.²



Obr. 12 Dům v Jižní Chile.

Severní Pákistán a část Kašmíru

8. října 2005 došlo k zemětřesení s magnitudem 7,5, které vyvolalo největší škody v pákistánských provinciích Gilgit-Baltistan a Khyber-Pakhtunkhwa. Celý region je velmi seismicky nestabilní díky geologické aktivitě, která je důsledkem střetu Euroasijské a Indické tektonické desky. Pákistánský region totiž leží v oblasti tohoto střetu tektonických desek. Pákistánské zemětřesení si vyžádalo 74 698 obětí.

Obyvatelé Pákistánu se proti zemětřesení začali bránit stavbami, které mají stěny ze slámy.



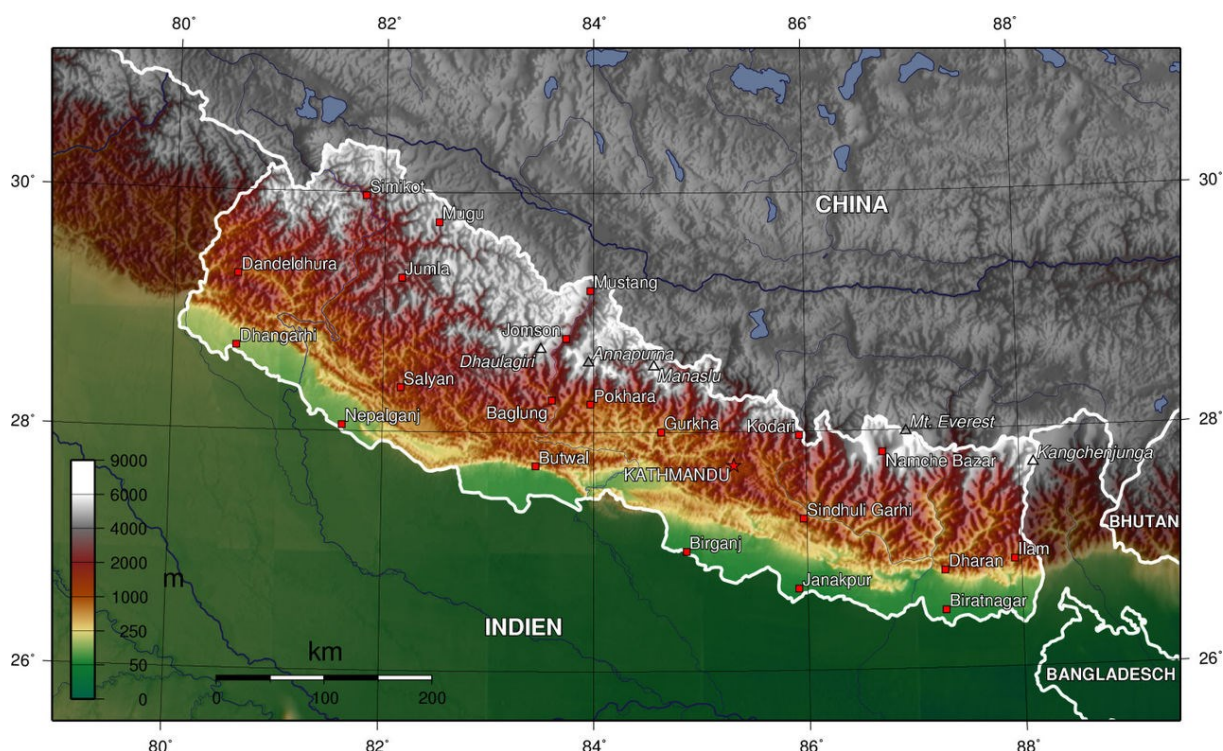
Obr. 13 Stavba domu v Pákistánu, který má stěny ze slámy.¹⁰

Peru

31. 5. 1970 došlo k největšímu zemětřesení v dějinách Peru s magnitudem 7,9. Hlášeny byly oběti ze čtyř regionů v Peru. Celkový počet obětí se odhaduje na cca 70 000. Následkem zemětřesení byl masivní sesuv úbočí hory Huascarán, který byl příčinou zasypání města Yungay téhož data. Při zemětřesení zahynulo i 14 členů československé horolezecké expedice.

Nepál

25. dubna 2015 došlo v Nepálu k nejsilnějšímu zemětřesení od roku 1934. Zemětřesení se označuje také jako Himalájské zemětřesení s magnitudem 7,9. O život přišlo více jak 8000 lidí a ztráty na životech byly zaznamenány i v Indii, Číně a Bangladéši. Zemětřesení spustilo lavinu pod Mount Everestem. Bylo poškozeno nebo zcela zničeno mnoho památek v Údolí Káthmándů, které jsou zapsány v seznamu UNESCO.



Obr. 14 Mapa – Himaláje, Nepál. ¹¹

3.7 Moderní opatření proti zemětřesení

Tektonická aktivita mohla přispět k zániku některých starověkých kultur. Vědci dělali archeologický výzkum ve Městě Megiddo (Izrael), kde mohla série zemětřesení přispět ke zmizení civilizace Harappan. V dnešní době jsou obyvatelé stejně citliví na následky zemětřesení. Ty mohou být v současnosti ještě rozsáhlejší, protože ve městech žije stále víc a víc lidí. Naštěstí se tahle problematika v posledních desetiletích více řeší. Odborníci

zabývající se touto problematikou vymýšlejí nové technologie, které mají zajistit, aby stavby odolávaly pohybům způsobeným otřesy země. V následující kapitole jsem se zabýval popisem různých technologií, které se snaží co nejlépe tuto problematiku vyřešit.

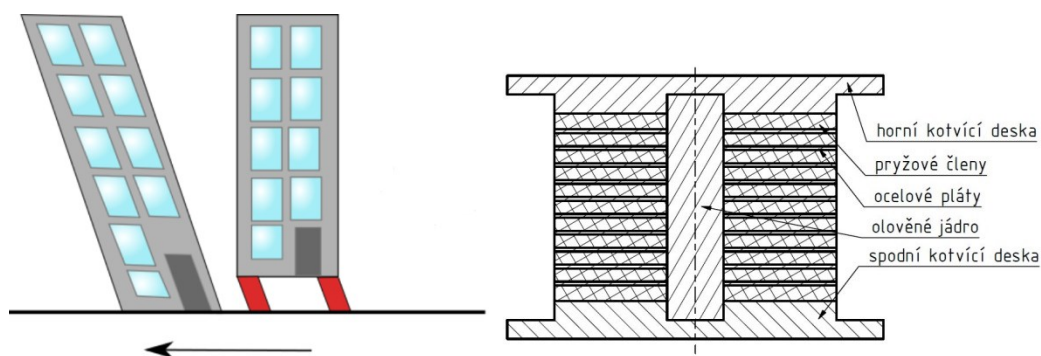
3.7.1 Levitace budovy

Odborníci již řadu let podporují levitující budovy jako ochranu proti zemětřesení. Tento princip jde provést několika způsoby.

Japonští inženýři přenesli tuto myšlenku na novou úroveň. Na základ budovy umístili senzory, které snímají otřesy. Senzory jsou synchronizované se vzduchovým kompresorem. Když ucítí otřesy, mezi základem budovy a půdou se vytvoří vzduchový prostor. Kompresor zvedne budovu až do výšky 3 cm od země. Po ustálení zemětřesení se kompresor vypne a budova se vrátí zpět na zem.

3.7.2 Tlumič rázu

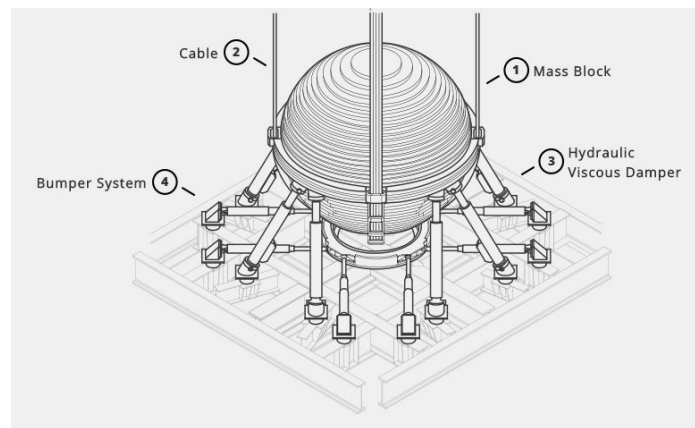
Budova je umístěna na pružných členech, které zpomalují a snižují velikosti sil způsobené zemětřesením. Základ stavby tvoří olovo-přýžové ložiska, která se skládají z horní a spodní kotvící desky, mezi kterými jsou pryžové členy, ocelové pláty a uprostřed olověné jádro. Tato ložiska jsou umístěna mezi ocelové desky a zabraňují přenesení pohybu způsobeného otřesy země.



Obr. 15 Princip tlumiče rázu, pružný člen

3.7.3 Stabilizátor mrakodrapu Taipei 101

Konstrukce mrakodrapu musí odolávat dvěma přírodním jevům. Tajfunu a zemětřesení. Pro tyto přírodní vlivy musí být konstrukce pružná a zároveň tuhá. Síly vznikající přírodními vlivy a zachycují se pomocí stabilizátoru, který se zhoupne proti směru působících sil, zatlačí na olejové tlumiče a odchylku vyrovná. Stabilizátor je ocelová koule o hmotnosti 730 tun a je zavěšena na 16 silných ocelových lanech.



Obr. 16 Stabilizátor mrakodrapu Taipei 101.

4 Návrh vhodné konstrukce domu

Inspirací pro mou práci a předlohou k návrhu domu byla fotografie japonské vesnice, která je vystavěna z domů typu Dome House 7700. Domy tohoto typu z pružného vyztuženého pěnového polystyrenu s klenutými stropy dokážou odolat ničivým otřesům při zemětřesení.

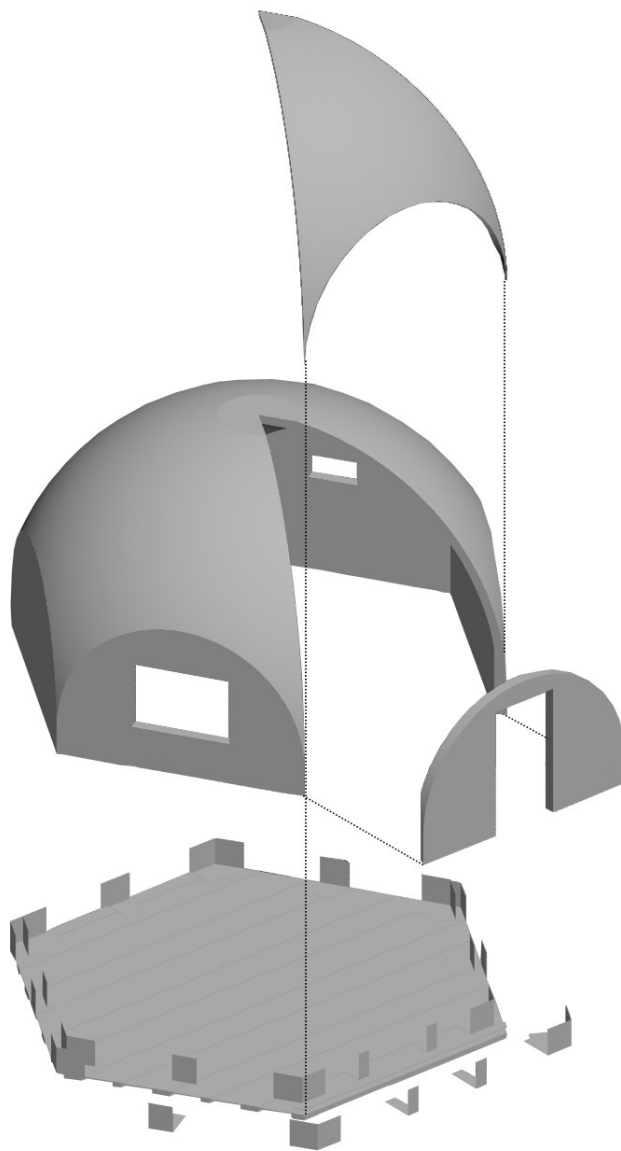


Obr. 17 Japonská vesnice z domů typu Dome House 7700.²⁰

Při svých úvahách jsem navrhnul konstrukci domu, která se skládá ze šesti stropních a šesti stěnných částí. Stropní část je skořepina kulovitého tvaru. Stěnné části tvoří rovné stěny, které mají po vrchním obvodu tvar polokoule a zespodu jsou prodlouženy o 500mm. V půdorysu vytváří šestiúhelníkový rovinný útvar. Šířka obou částí je 175mm. Stavba může být ukotvena buď napevno k podlaze pomocí spojovacích prvků a šroubů nebo usazena na pohyblivých válečcích. Spojovací prvky jsou ve vrcholech a polovině každé strany šestihranu. Spojení stropní a stěnné části drží pomocí zámků, lepidla a vlastní váhy stropní části.

4.1 Variantní řešení problému a zhodnocení

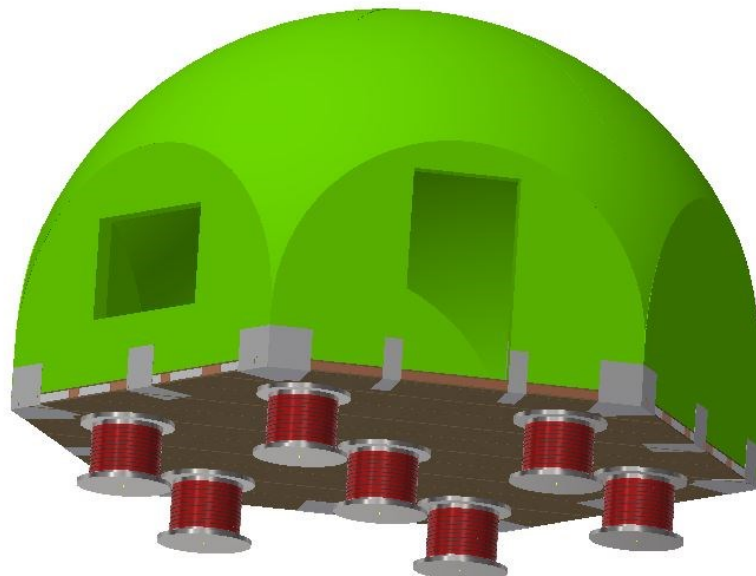
4.1.1 Axonometrický řez modulu stavby ukotvené napevno



Obr. 18 Axonometrický řez modulu stavby.

4.1.2 Varianta s ložisky

Stavba je ukotvena na pružných členech viz. kap. 3.7.2. Tato varianta je pro nás nevýhodná z důvodu složité montáže a výroby pružných členů.



Obr. 19 Varianta s ložisky.

4.1.3 Volba materiálu

4.1.3.1 Možné varianty použití materiálů

Příklady materiálů, které se dají vytvarovat podle formy.

Materiál	ρ_{dn}	c_{dn}	μ_n	$\delta_n \cdot 10^9$	λ_P
Polystyren pěnový	60	1270	40-67	0,047-0,002	0,039
Polyuretan pěnový	35	1500	180-260	0,001-0,00072	0,032
Minerální plsti lisované	500	1150	5-12	0,038-0,016	0,088
PVC pěněné	60	1350	265	0,00071	0,051
Pěnová pryskyřice	50	1250	2,5-6,5	0,075-0,029	0,061

Tab. Vlastnosti materiálů ²

Po konzultaci s vedoucím firmy VD-Brumovice, která uvažuje o výrobě těchto domků, jsem jako materiál zvolil pěnový polyuretan s hustotou pěny $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Firma má s tímto materiálem dobré zkušenosti. Technologie lití a vypěňování PUR pěny nachází uplatnění především v automobilovém průmyslu, při výrobě sportovních potřeb, ve stavebnictví apod.

4.1.3.2 Vlastnosti hlavního materiálu

Hlavním materiálem byl zvolen polyuretan s hustotou pěny $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ dle normy ČSN 645411. Tento materiál má unikátní izolační vlastnosti.¹²

VLASTNOST	JEDNOTKA	HODNOTA
Hustota pěny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$80 \pm 10\%$
Mez pevnosti v tlaku	$[\text{kPa}]$	320
Modul pružnosti v tahu	$[\text{kPa}]$	8 500
Mez pevnosti v tahu	$[\text{kPa}]$	400
Mez pevnosti v ohybu	$[\text{kPa}]$	350
Absorpce vody	$[\%]$	< 3
Reakce na oheň	$[-]$	E
Doporučená pracovní teplota	$[\text{°C}]$	$-70 - +130$
Obsah uzavřených buněk	$[\%]$	>90
Součinitel prostupu tepla při 10 °C	$[\text{W/mK}]$	0,022
Faktor difuzního odporu	$[-]$	$\mu > 20$

Tab. Vlastnosti hlavního materiálu ³

4.1.3.3 Výhody zvoleného materiálu

- vynikající tepelně izolační vlastnosti (ušetří až 50 % tloušťky)
- je zdravotně nezávadný a nevylučuje žádné škodliviny
- při hoření neskapává, je samozhášivý
- je difuzní, má schopnost propouštět vodní páru (čím menší je hodnota difuzního odporu, tím lépe materiál „dýchá“ a umožňuje vodní páře a plynům pohyb konstrukcí)

4.1.3.4 Nevýhody zvoleného materiálu

- cena

4.2 Tahová zkouška

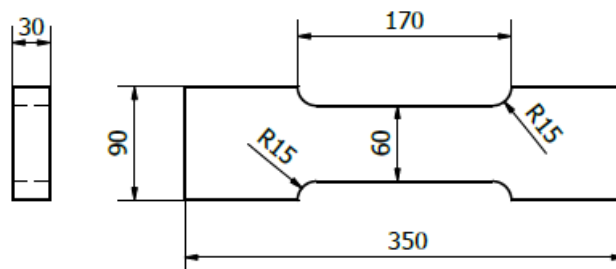
Jelikož jsem neměl dostatečné informace o materiálových vlastnostech, potřebných zejména do MKP simulace, provedl jsem s pomocí vedoucího diplomové práce tahovou zkoušku materiálu a tím zjistil neznámou veličinu - Poissonovu konstantu.

4.2.1 Příprava zkušebního vzorku

Rozměry vzorku jsme určili dle upínacích prvků a velikosti hydraulického trhacího stroje ZD40.



Obr. 20 Trhací stroj ZD40.



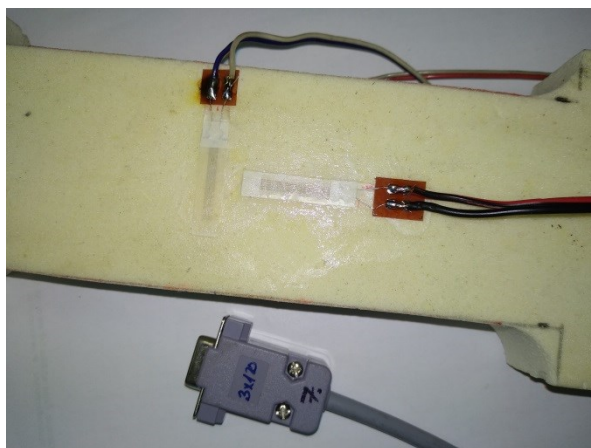
Obr. 21 Rozměry zkušebního vzorku

Pro výrobu vzorku jsem požádal firmu VD-Brumovice o vytvoření formy a následné vypěnění daným materiálem. Pro zkoušku jsme měli vypěněné dva vzorky.

Pro zjištění neznámé Poissonovy konstanty jsme potřebovali znát poměr mezi relativním prodloužením a relativním příčným zkrácením. Uvedené parametry jsme zjistili pomocí tenzometrů, které jsme upevnili ve dvou směrech. První ve směru zatěžující síly a druhý kolmo ke směru zatěžující síly. K dispozici jsme měli drátkové odporové tenzometry typu C s Ohmovou hodnotou $120,7 \pm 0,25\%$ a konstantou snímače $2,08 \pm 0,1\%$. Před upevněním tenzometrů jsme zkontrolovali, zda odpovídají jejich parametry, proto jsme proměřili všechny tenzometry multimetrem, jestli je jejich Ohmova hodnota ekvivalentní.

4.2.2 Upevnění tenzometrů na zkušební vzorek

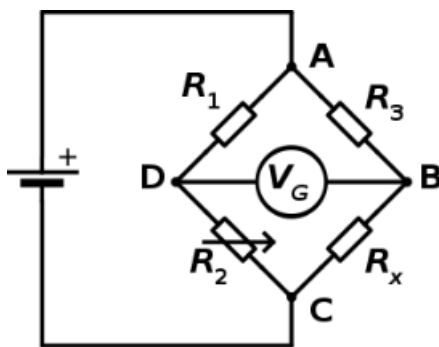
Vzhledem k tomu, že byly používány drátkové odporové tenzometry na zkušební materiál, potřebovali jsme speciální lepidlo přenášející přesný pohyb vzorku na tenzometr. Další podmínkou pro volbu lepidla bylo, aby nezpůsobilo deformaci daného tenzometru. Běžně dostupná lepidla jsou příliš tvrdá a křehká. Zkušební materiál byl pórovitý a drolil se, proto jsme vytvořili speciální lepidlo z rozpuštěných pingpongových míčků v acetonu. Lepidlo bylo plastičtější a pružnější než tenzometr a materiál, na který se lepilo. Na vzorku jsme si určili místo, kam jsme tenzometry upevnili. Na uvedené místo jsme nanесли vrstvu lepidla, která zalila póry materiálu a vytvořila rovnou plochu pro nalepení tenzometru. Vrstvu jsme nechali chvíli ztuhnout a připravili si tenzometr. Na něj jsme nanесли z obou stran vrstvu lepidla. Po ztuhnutí lepidla na vzorku jsme přiložili tenzometr na námi určené místo. Na tenzometr jsme museli před zatížením položit teflonovou pásku, aby se nepřilepil molitan, který umožnil rovnoměrné zatížení na plochu tenzometru, ať se nezdeformují odporové drátky. Poté jsme položili na molitan sešit a nechali lepidlo ztuhnout. Stejným způsobem jsme upevnili pájecí patky, které sloužily ke spojení s drátky konektoru pomocí technologie pájení. Příklad realizace je na následujícím obrázku.



Obr. 22 Upevnění tenzometrů na zkušební vzorek.

Pro lepší práci s naměřenými daty jsme na konektoru vytvořili Wheatstoneův můstek, který provádí rozdíl signálu mezi dvěma body C – D (Obr. 23), takže výstup byl úměrný změnám

a konstantní hodnoty odporů se eliminovaly. R_1 , R_2 , R_3 jsou odpory o hodnotě $120\ \Omega$ a R_x je odporový drátkový tenzometr. Ve výsledku jsme dostali místo naměřených hodnot $R = 120\ \Omega$ na $R = 120,171\ \Omega$ jen změnu odporu $R = 0\ \Omega$ na $R = 0,171\ \Omega$.



Obr. 23 Wheatstoneův můstek.⁷

4.2.3 Potřebná zařízení tahové zkoušky

Pro datový záznam tahové zkoušky jsme použili záznamový osciloskop DL520 Yokogawa, který je univerzální osciloskop s vysokou frekvencí záznamu (až $100\ \text{kHz}$ pro tenzometrické kanály) se záznamem do paměti ($1 \cdot 10^6$ záznamů) nebo s přímým vzorkováním na pevný disk s možností velmi dlouhých záznamů a s možností připojení až 16 měřených míst.



Obr. 24 Záznamový osciloskop DL520 Yokogava.⁶

Pro výpočet poměrného prodloužení napjatosti jsme použili vztah:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot U_m}{k \cdot n} [\text{‰}] \quad (1)$$

U_m výstupní napětí z tenzometrického mostu [V]

n počet „aktivních“ tenzometrů [-]

k konstanta tenzometru [-]

4.2.4 Cejchování

Po zapojení osciloskopu s trhacím strojem jsme provedli cejchování snímače stroje měřícího zatížení. Zatížili jsme stroj bez vzorků danou silou a zapisovali hodnoty, které měřil osciloskop. Po úpravě těchto hodnot v Excelu jsme dostali křivky, z kterých jsme získali směrnici z kN na V.

SÍLA [kN]	1. MĚŘENÍ[V]	2. MĚŘENÍ[V]	3.MĚŘENÍ[V]
0,2	0,0022	0,00166	0,00179
0,4	0,00366	0,00368	0,00318
0,6	0,00541	0,00503	0,00484
0,8	0,00691	0,00689	0,00684
1	0,00881	0,00863	0,00857
směrnice	121,2104263	116,3126647	115,714453
průměr směrnic	117,745848		

Tab. 4 Cejchování stroje

4.2.5 Zapojení konektorů

Nyní jsme měli vše připraveno ke zhotovení tahové zkoušky. Zapojili jsme konektory do osciloskopu a zapsali, na jakém kanále máme zapojeny tenzometry (viz Tab. 5)

KANÁLY	PŘIPOJENÉ ZAŘÍZENÍ
Kanál 1	Síla
Kanál 2	Podélný tenzometr z přední strany
Kanál 3	Příčný tenzometr z přední strany
Kanál 4	Podélný tenzometr ze zadní strany
Kanál 5	Příčný tenzometr ze zadní strany

Tab. 5 Zapojení tenzometrů

Provedli jsme zkoušku, zda jsou tenzometry správně zapojeny, a to tak, že jsme v ruce zatížili materiál a na osciloskopu sledovali průběh napětí. Ten byl reálný, proto jsme mohli pokračovat.

4.2.6 Výpočet odhadované síly při přetržení

Před samotnou zkouškou jsme vypočítali sílu, při které se má vzorek přetrhnout. Podle parametrů materiálu dodávaných výrobcem jsme znali pevnost v tahu a průřez zúženého místa vzorku, kde pravděpodobně dojde k přetrhnutí.

Odhadovaná síla při přetržení

$$F_{ODH} = \sigma_T \cdot S = 1800 \cdot 0,4 = 720 \text{ N} = 0,72 \text{ kN} \quad (2)$$

Pevnost v tahu $\sigma_T = 400 \text{ kPa} = 0,4 \text{ MPa}$

Průřez v místě zúžení $S = 60 \cdot 30 = 1800 \text{ mm}^2$

4.2.7 Tahová zkouška prvního vzorku

Postup měření byl následující:

- upnuli jsme zkušební vzorek do čelistí trhačího stroje a zatížili silou 0,3 kN a poté zatížení vypnuli
- následně jsme vzorek stejným způsobem zatížili na 0,4; 0,42 kN a při zatížení 0,5 kN se vzorek přetrhnul

Dle tvaru lomu bylo zřetelné, že vzorek byl vyroben špatně, což odpovídá srovnání s odhadovanou silou, která byla o 0,22 kN větší. Lom byl nepravidelný a povrch lomu měkký.



Obr. 25 První vzorek po tahové zkoušce.

4.2.8 Tahová zkouška druhého vzorku

První zatížení jsme nastavili na 0,4 kN, druhé na 0,43 kN a při třetím zatížení jsme vzorek zatěžovali do prasknutí, do hodnoty 0,96 kN. Tvar lomu druhého vzorku byl pravidelný a povrch lomu tvrdý. Vzorek byl vypěněn správně. Odhadovaná síla byla o 0,24 kN menší než skutečná.



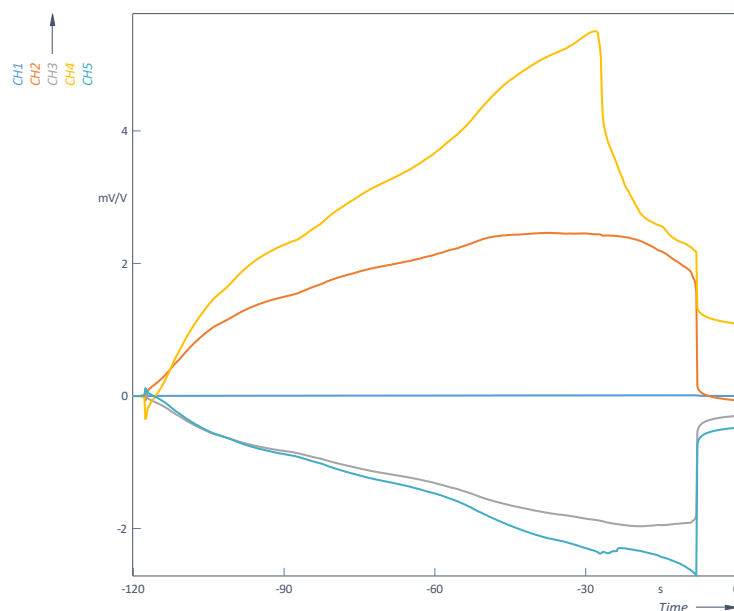
Obr. 26 Druhý vzorek po tahové zkoušce.

4.2.9 Dílčí závěr

V dalších krocích jsme počítali s výsledky druhého vzorku, protože první vzorek byl zřejmě nekvalitní (při tahové zkoušce došlo k utržení vzorku před dosažením předpokládané hodnoty při 70% odhadované síly přetržení).

4.3 Vyhodnocení výsledků

Pomocí programu FlexPro jsem vyhodnotil datový záznam tahové zkoušky a vytvořil grafy pro zjišťování námi neznámých vlastností zkoušeného materiálu. Na obr. jsem vytvořil graf, na kterém jsou znázorněny průběhy síly (CH1), relativního prodloužení (CH2, CH4) a relativního příčného zkrácení (CH3, CH5). Dle výsledku je zřejmé, že se při zkoušce vzorek také ohýbal, protože relativní prodloužení přední strany vzorku je 1,63krát větší než relativní prodloužení zadní strany vzorku.

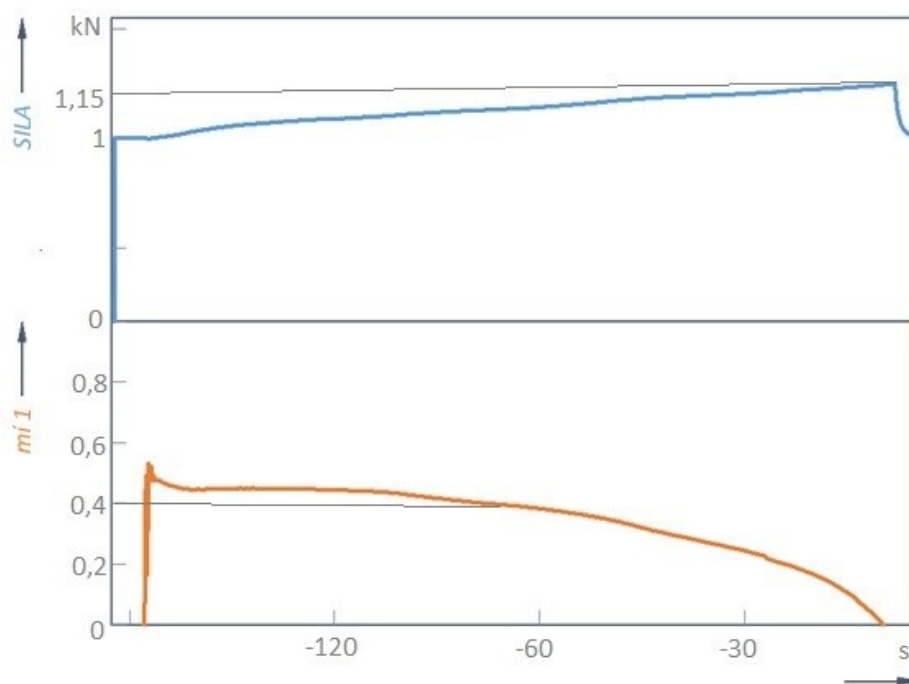


Obr. 27 Průběh tahové zkoušky druhého vzorku.

4.4 Vyhodnocení Poissonovy konstanty

V programu FlexPro lze pracovat s daty podobně jako v Excelu. Pro datové záznamy z tenzometrů jsem použil vztah udávaný k záznamovému osciloskopu. Datový záznam ze síly jsem vynásobil hodnotou 0,001, na kterou jsem přišel pomocí směrnice a převodu jednotek.

Poté jsem spočítal poměr podélného tenzometru (CH5) ku příčnému tenzometru (CH4). Následně jsem vytvořil graf (viz. Obr. 28), kde na svislé ose je znázorněn poměr (mí 1 - Poissonovo číslo = 0,4) a zatěžující síla. Vodorovná osa udává čas trvání zkoušky. Z grafu průběhu zatěžující síly byla vyjádřena mez kluzu $F_E = 1 \text{ kN}$ a pevnosti $F_M = 1,15 \text{ kN}$.



Obr. 28 Průběh vyhodnocení Poissonovy konstanty.

4.5 Pevnostní kontrola nosné konstrukce domu.

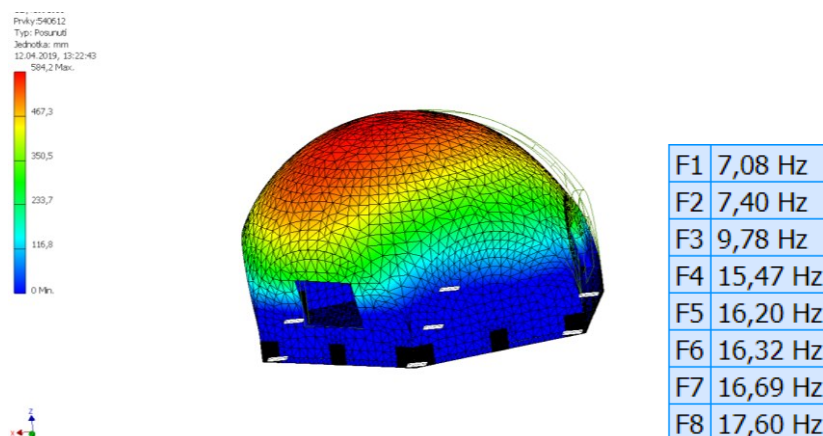
Pomocí programu Inventor jsem zjistil přirozené frekvence, kdy dochází k rezonanci. Tato frekvence je nežádoucí, neboť stavba při zemětřesení by mohla začít rezonovat a tím je větší pravděpodobnost, že dojde k porušení nebo zhroucení stavby.

Nastavení materiálu v programu.

Výpočet skutečné meze pevnosti v tahu

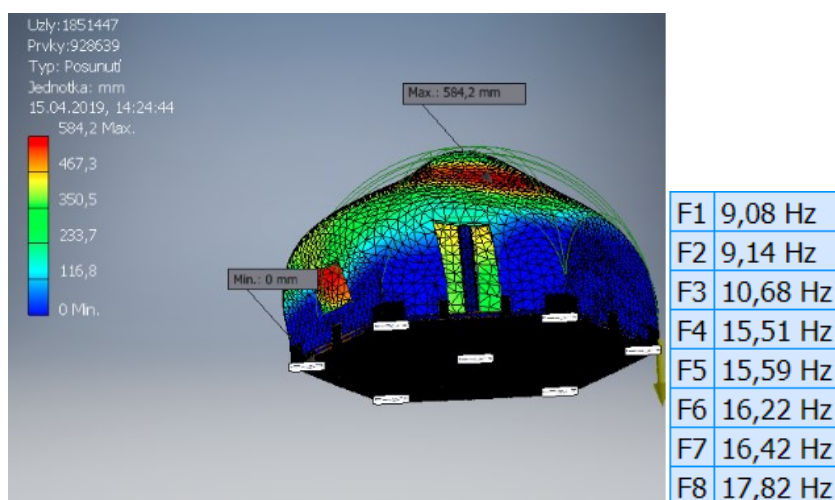
$$R_{mskut} = \frac{F_M}{S} = \frac{1150}{30 \cdot 60} = 0,638 \text{ MPa} \quad (3)$$

Kontrolu jsem provedl pomocí modální analýzy. Pevnou vazbu jsem nastavil na součástech rámu, které jsou umístěny na vrcholech šestihranné podlahy. Poté jsem vytvořil síť a modální analýzu, která vyhodnocuje režimy přirozené frekvence včetně pohybů tuhého tělesa. Zadal jsem si podmínku, že se výsledky mají pohybovat v intervalu >10 Hz. Proto jsem musel model vyztužit, aby došlo k vlastnímu kmitání ve vyšších frekvencích.



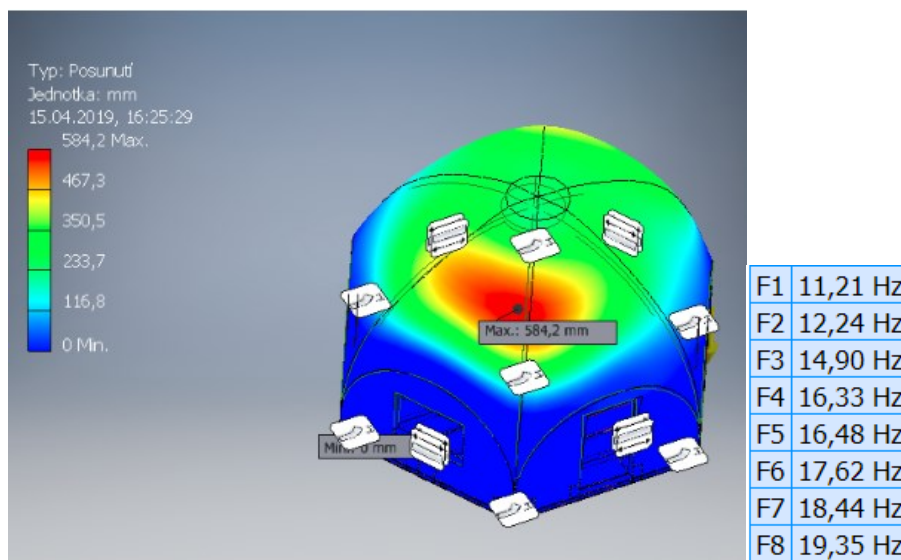
Obr. 29 Modální analýza prvního návrhu.

Experimentální metodou jsem zkusil vyztužit stavbu pomocí ocelové vzpěry, kterou jsem upevnil do středu podlahy a do vrchní části střechy. Výsledky byly lepší, ovšem stále nedostačující.



Obr. 30 Modální analýza druhého návrhu.

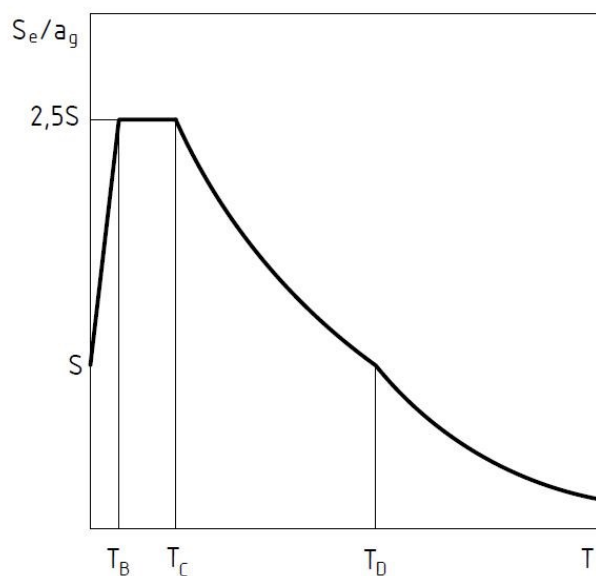
Pro další zpevnění stavby jsem vytvořil vazbu, která omezila stupně volnosti bočním stěnám ve vodorovném směru. Tento krok se dal zrealizovat přidáním nového materiálu např. kari sítě do stěny nebo z obou stran polyuretanové desky, přidat pevnější materiál např. dřevěné desky, laminát a tím vytvořit tzv. „sendvič“.



Obr. 31 Modální analýza třetího návrhu.

4.6 Výpočet zatěžujících sil dle normy ČSN EN 1998-1²⁵

Pohyby způsobené zemětřesením jsou popsány spektrem pružné odezvy na zrychlení podloží. Zrychlení je uvažováno ve vodorovném a svislém směru. Ve vodorovném směru se dvěma na sebe kolmými složkami, které mají stejná spektra pružné odezvy. Ve svislém směru je počítáno s jednou složkou s vlastním svislým spektrem pružné odezvy.



Obr. 32 Tvar spektra pružné odezvy.

Tvar spektra pružné odezvy (obrázek 32) závisí na typu základové půdy. Popisuje závislost mezi zrychlením podloží a dob kmitu.

4.7 Volba typu základových půd

Volím typ C = Mocné sedimenty středně ulehlého nebo ulehlého písku, štěrk nebo tuhý jíł v tloušťce od několika desítek do stovek metrů

Parametry základové půdy typu C		
Průměrná rychlost smykových vln	Počet úderů / 30 cm	Tlak
$v_{s,30}$ [m/s]	N_{APT}	C_u [kPa]
180-360	15-50	70-250

Tab. 6 Parametry základové půdy

4.7.1 Spektrum vodorovné pružné odezvy $S_e(T)$

Je počítáno dle vlastních kmitů lineární soustavy s jedním stupněm volnosti, další parametry jsou zvoleny podle typu podlaží.

Hodnoty popisující spektrum vodorovné pružné odezvy			
S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
1,15	0,20	0,6	2,0

Tab. 7 Hodnoty spektra vodorovné pružné odezvy

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{11,21} = 0,089 \text{ s} \quad (4)$$

Frekvence kmitů lineární soustavy je rovna $f=11,21$ Hz

Výpočet periody kmituZ podmínky $0 \leq T \leq T_B$ je dán vzorec pro výpočet $S_{e(T)}$

$$S_{e(T)} = a_g * S * \left[1 + \frac{T}{T_B} * (\eta * 2,5 - 1)\right] \quad (5)$$

$$S_{e(T)} = 1,17 * 0,15 * \left[1 + \frac{0,089}{0,2} * (1 * 2,5 - 1)\right]$$

$$S_{e(T)} = 0,29$$

Z tabulky třídy významu má stavba význam odpovídající významu II – Obvyklé pozemní stavby, nepatřící do ostatních kategorií.

$$a_g \quad \text{návrhové zrychlení podloží typu A } (a_g = \gamma_I * a_{gR})$$

γ_I Třída významu - z tabulky třídy významu má stavba význam odpovídající významu II – Obvyklé pozemní stavby, nepatřící do ostatních kategorií. Pro tuto třídu je hodnota $\gamma_I = 1$ (str. 166)

a_{gR} Referenční zrychlení základové půdy – dle mapy ČR je nejpostiženější kraj Karvinský a Chebský, kde vychází $a_{gR} = 0,12 * g$ (str. 165)

T_B nejmenší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota spektra pružného zrychlení

T_C největší perioda kmitů, které přísluší konstantní hodnota spektra pružného zrychlení

S součinitel podloží

η korekční součinitel útlumu = 1

Spektrum pružné odezvy posunu $S_{De(T)}$

$$S_{De(T)} = S_{e(T)} * \left[\frac{T}{2 * \pi} \right]^2 \quad (6)$$

$$S_{De(T)} = 0,29 * \left[\frac{0,089}{2 * \pi} \right]^2$$

$$S_{De(T)} = 0,00005$$

4.7.2 Spektrum svislé pružné odezvy

Hodnoty popisující spektrum svislé pružné odezvy			
a_{gs}	T_{BS} [s]	T_{CS} [s]	T_{DS} [s]
0,9	0,05	0,15	1

Tab. 8 Hodnoty spektra svislé pružné odezvy

Z podmínky $T_B \leq T \leq T_C$ je dán vzorec pro výpočet $S_{ve(T)}$

$$S_{ve(T)} = a_{vg} * \eta * 3,0 \quad (7)$$

$$S_{ve(T)} = 0,9 * 1 * 3,0$$

$$S_{ve(T)} = 2,7$$

4.8 Výpočet hodnot pro navrhování testovacího stroje

Hodnoty odvozené z normy ČSN 1998-1:

$$a_{gs} \quad \text{zrychlení ve svislém směru} = 0,9m \cdot s^{-2}$$

$$a_{vg} \quad \text{zrychlení ve vodorovném směru} = 1,17m \cdot s^{-2}$$

Hodnoty vypočtené pomocí programu Inventor

$$m \quad \text{hmotnost stavby} = 4139kg$$

$$m_R \quad \text{hmotnost rámu} = 3393kg$$

4.8.1 Svislý pohyb stroje

Z druhého Newtonova zákona jsem vypočítal sílu, která vykonává pohyb stroje ve svislém směru. Pohon musí také překonávat gravitační sílu, kterou jsem sečetl se zrychlením odvozené z normy ČSN 1998-1.

$$a_{CS} = a_{gs} + a = 0,9 + 9,81 = 10,71 m \cdot s^{-2} \quad (8)$$

Výpočet hmotnosti stroje bez komponentů vytvářejících pohyb

$$m_C = m + m_R = 4139 + 3393 = 7\,532\,kg \quad (9)$$

Výpočet síly potřebné k nasimulování svislého pohybu stroje

$$F_S = m_C \cdot a_{CS} = 4138,6 \cdot 10,71 = 80\,663\,N \quad (20)$$

4.8.2 Vodorovný pohyb stroje.

Pomocí zrychlení zjistím sílu, která vykonává vodorovný pohyb.

$$F_V = m_C \cdot a_{vg} = 7532 \cdot 1,17 = 8812\,N \quad (31)$$

Volím hydraulický válec z katalogu výrobce Svoboda²⁴ s označením CB 100 45 A – 80 s parametry:

Vnitřní průměr válce:	$D = 100\,mm$
Průměr pístnice:	$d = 70\,mm$
Maximální pracovní tlak:	$p = 16\,MPa$
Tlačná síla:	$F_{TL} = 12\,560\,N$
Maximální rychlost pístu:	$v_p = 0,6\,m \cdot s^{-1}$
Zdvih:	$z = 80\,mm$

Na vodorovných stranách stroje použiji dva hydromotory a na svislých devět.

4.9 Návrh testovacího stroje

Mým úkolem bylo navrhnout testovací stroj, který bude simulovat zemětřesení. Stroj se skládá z nosného rámu a pohonu, který vyvolává zatížení simulující zemětřesení. Zmíněné zatížení je rozděleno do tří složek. Dvě složky působí v jedné rovině a jsou vůči sobě navzájem kolmé a ekvivalentní. Třetí složka působí ve svislém směru a je dominantnější vzhledem ke gravitačnímu zrychlení. Poháněné jednotky stroje jsou hydromotory, umístěné mezi dva dvouosé klouby, umožňující vyrovnat zachytit všechny směry pohybu. Řešení je ideové, nejsou řešeny detaily. Rám by musel být jištěn nejlépe pružnými dorazy a jeho poloha hlídána snímači polohy pohybu rámu, který bude řízen předem nastavenému rozmezí.

4.9.1 Výpočet intervalu působících sil

V normě ČSN EN 1998-1 jsem vypočítal maximální sílu vyjadřující nejvyšší zatížení, které je vyvoláno zemětřesením. Předpokládal jsem, že je to maximální hodnota kmitu, tudíž jsem počítal s tím, že musím zohlednit také reakci výše zmíněného kmitu, která byla symetrická s maximální silou, podle síly ve stavu soustavy v klidu.

4.9.1.1 Interval sil svislého směru

$$F_{SMAX} = F_S = 80\,663\,N \quad (42)$$

$$F_{SMIN} = m_C(a - a_{gs}) = 4138,6 * (9,81 - 0,9) = 36\,875\,N \quad (13)$$

$$\langle 36\,875; 80663 \rangle$$

4.9.1.2 Interval sil vodorovného směru

$$F_{VMAX} = F_V = 8812N \quad (14)$$

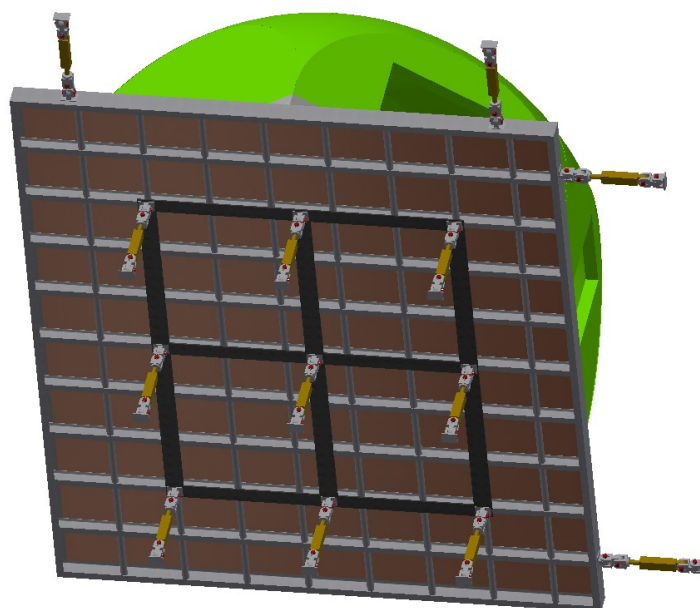
$$F_{VMIN} = m_C a_{VGMIN} = 7532 \cdot 0,83 = 6251N \quad (15)$$

$$\langle 6251; 8812 \rangle$$

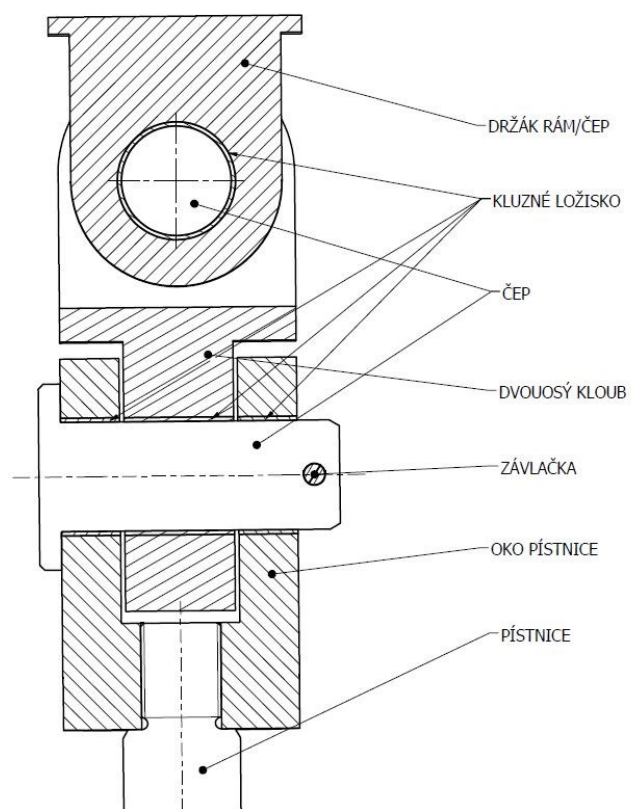
$$a_{VGMIN} \quad \text{zrychlení pro výpočet minimální vodorovné síly} = 0,83m \cdot s^{-2}$$

Dle normy ČSN EN 1998-1 jsem zjistil zatížení způsobené zemětřesením, které se rozděluje do dvou složek vodorovného směru navzájem kolmých a jedné složky svislého směru. Tyto složky byly přepočítány do sil, pomocí kterých jsem navrhnul pohon stroje.

4.9.2 Model stroje



Obr. 33 Návrh stroje.



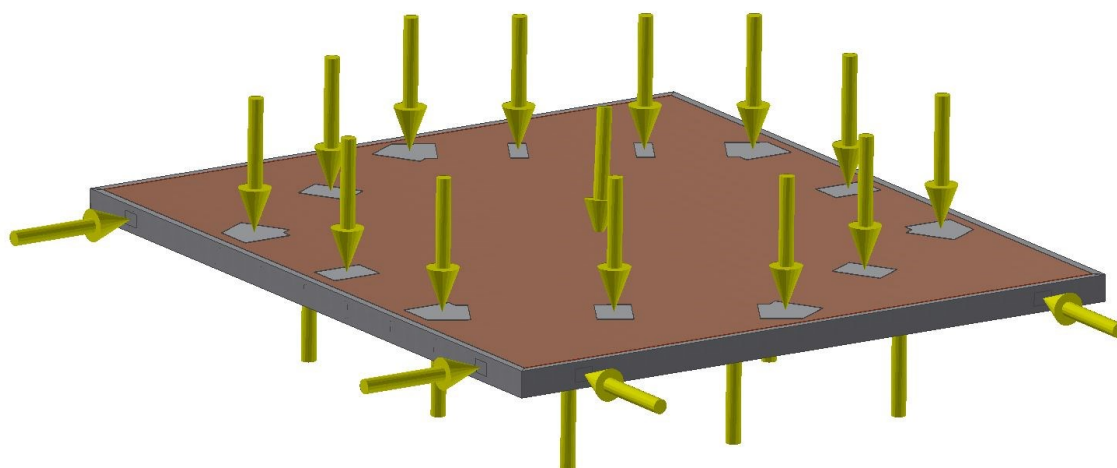
Obr. 34 Detail uložení pístnice k rámu

4.10 Pevnostní kontrola

Pro navržení testovacího stroje jsem provedl pevnostní kontrolu. Pohon stroje vyhovuje dle svých parametrů zadané firmou. Kontrolu provádím pro navržený rám stroje a stavby.

4.10.1 Pevnostní kontrola rámu stroje

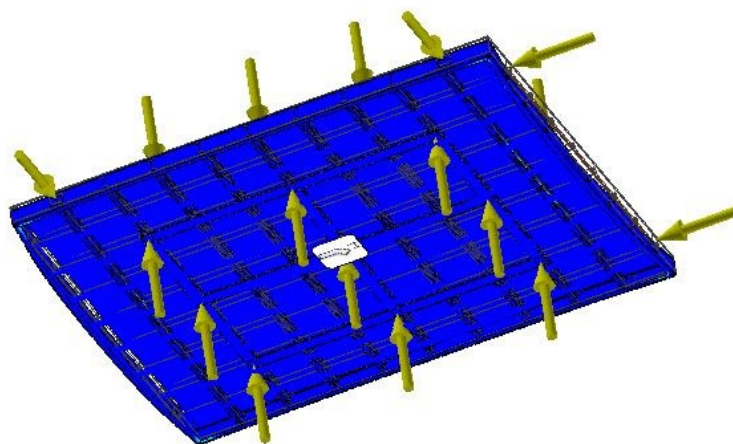
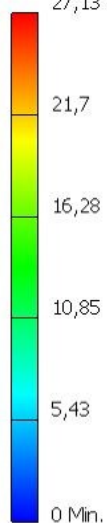
Rám byl vytvořen svařovanou konstrukcí, skládající se z různých profilů. Po obvodu byly použity profily U 300²³ a vnitřní prostor byl vyztužen profily I 200²³, mezi nimiž byly vloženy profily TR $\varnothing 102 \times 5$ ²³. Na svařovanou konstrukci se poté přišroubuje deska, na kterou se připevní stavba.



Obr. 35 Okrajové podmínky statické analýzy rámu stroje

Pevnostní kontrola byla provedena v programu Inventor pomocí statické analýzy. Na obrázku 35 jsou znázorněná zadaná zatížení a vazby. Rám je zatížen maximálními svislými a vodorovnými silami způsobené pohonem stroje. Dále na rám působí tíha stavby.

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
17.05.2019, 22:28:55
27,13 Max.



Obr. 36 Výsledky statické analýzy rámu stroje

Svařovaná část rámu byla navržena z materiálu 11 523, který má mez kluzu 333 MPa.²³

$$333 > 27,13 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (56)$$

4.10.2 Pevnostní kontrola stavby

Stavba byla kontrolována pomocí programu Inventor. Zatížení jsem nastavil pomocí gravitace, která byla zavedena ve třech složkách (obrázek 37). Pevná vazby byla přidána na kotevní součásti stavby.

Upravit gravitaci

Směr

Velikost 1083,706 mm/s²

OK Storno <<

☒ Použít vektorové komponenty

g[X] 117,000 mm/s²

g[Y] -1071,000 mm/s²

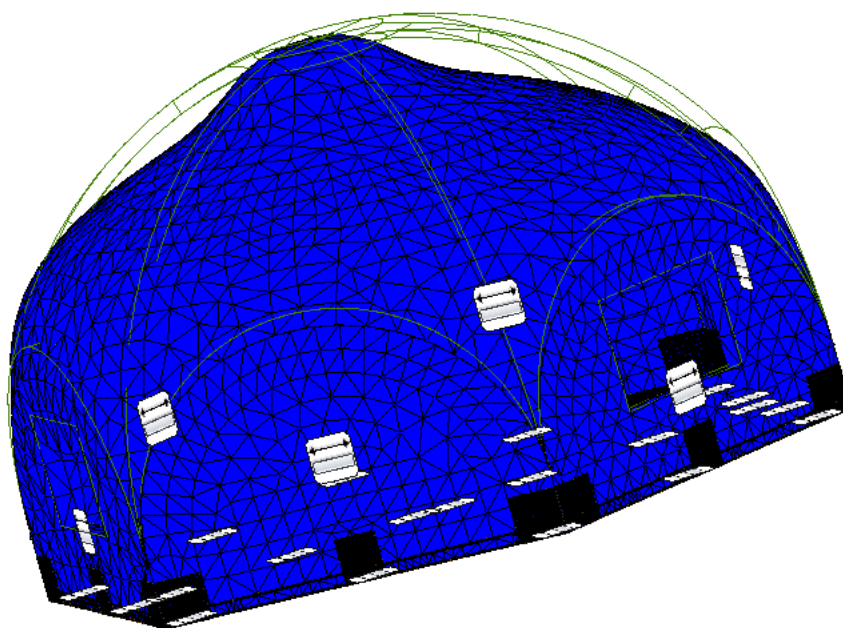
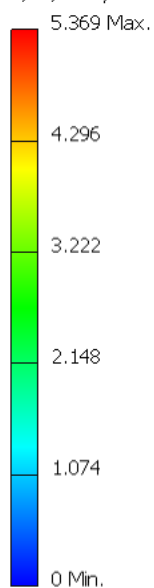
g[Z] 117,000 mm/s²

☒ Zobrazit symbol

Měřítko 1,000

Obr. 37 Nastavení zatížení zemětřesení

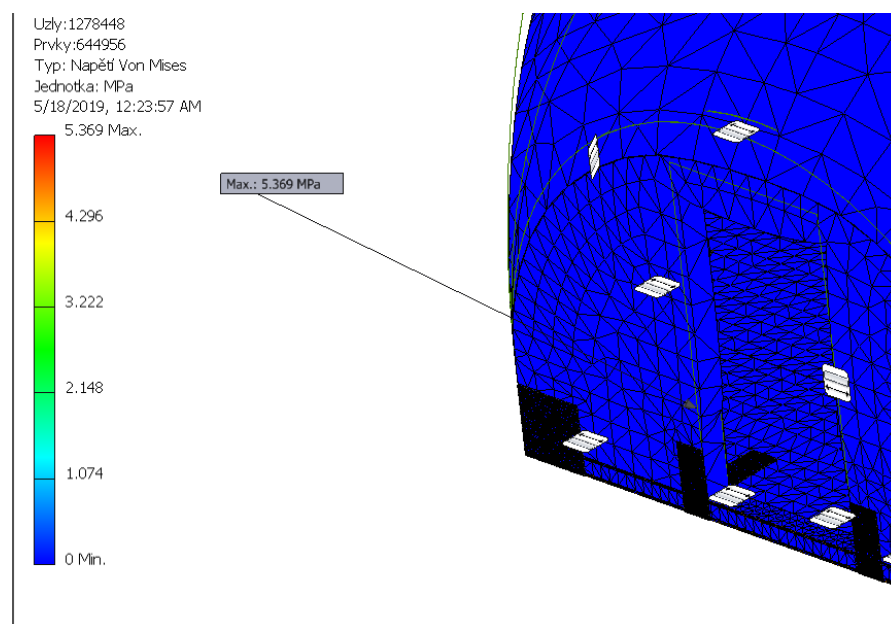
Uzly:1278448
 Prvky:644956
 Typ: Napětí Von Mises
 Jednotka: MPa
 5/18/2019, 12:06:19 AM



Obr. 38 Výsledek

Výsledky pevnostní analýzy nevyhovují podmínce. Nevyhovující podmínky jsou právě z důvodu hodnot, kterým odpovídá nejvyšší napětí znázorněné na obrázku 39. V místě, kde vzniká nejvyšší napětí, je materiál vyztužen a má větší mez pevnosti než samotný polyuretan.

Podle barev legendy a stavby můžeme konstatovat, že jsou hodnoty napětí v částech stavby, kde je pouze polyuretan přibližně 0,3 MPa.



Obr. 39 Maximální napětí pevnostní analýzy

Podmínka pro výpočet vyplývá z meze kluzu materiálu F_E viz. 4.4

$$R_{eskut} = \frac{F_E}{S} = \frac{1000}{30 \cdot 60} = 0,555 \text{ MPa} \quad (67)$$

$$0,555 > 0,3 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (78)$$

5 Závěr

V práci byly splněny všechny podmínky vyplývající ze zadání. V diplomové práci jsem se zaměřil na návrh konstrukce a testování domu do seismických oblastí. Včetně konstruktivních a technických aspektů jsem popsal problematiku samotného zemětřesení. Především jsem se zaměřil na návrh sestavy vhodné konstrukce na základě moderního materiálu, dále provedení pevnostní kontroly nosné konstrukce stavby, která je při zemětřesení namáhána. Další součástí byla simulace zemětřesení na základě mnou navrženou konstrukcí testovacího zařízení, pro které bylo nutné rovněž provést kinematické a pevnostní výpočty.

K sestavení domu, který odolá zatížení zemětřesení, existují dvě variantní řešení. Ukotvení stavebního modulu napevno, nebo za použití ložisek, které ovšem ale nejsou výhodné. Musel jsem se ale především zaměřit na nosnost konstrukce stavby odolávající zatížení způsobené zemětřesením. Původním cílem bylo provést pevnostní analýzu stavby, ale vzhledem k nedostačujícím informacím o vlastnostech materiálu, jsem musel provést tahovou zkoušku, díky níž jsem zjistil Poissonovu konstantu označující poměr relativního prodloužení ku příčnému zkrácení. Díky práci s programem Inventor jsem zjistil pomocí modální analýzy vlastní frekvence stavby. Na počátku jsem si zadal podmínku, že musí vyjít vlastní frekvence stavby $>10\text{Hz}$. Při první analýze byla spočítána vlastní frekvence stavby $7,08\text{Hz}$, což je nedostačující.

Experimentální metodou jsem se pokusil vyztužit stavbu pomocí ocelové vzpěry, kterou jsem upevnil do středu podlahy a do vrchní části střechy. Výsledky byly lepší, ovšem stále nedostačující. Vlastní frekvence vyšla $9,08\text{ Hz}$.

Provedl jsem další experimentální návrh stavby, kdy jsem vytvořil pomocí ideální vazby vazbu pro omezení stupně volnosti bočním stěnám ve vertikálním směru. Při realizaci konstruktivního návrhu se dá využít vyztužení přidáním nového materiálu. Tento návrh je dostačující. Vlastní frekvence vyšla $11,21\text{ Hz}$.

Při návrhu konstrukce testovacího zařízení pro simulaci zemětřesení jsem potřeboval zjistit vstupní parametry stroje. Tyto parametry jsem vypočítal pomocí normy ČSN EN 1998-1, díky níž jsem zjistil zrychlení zemětřesení ve třech směrech, kde měly dva vodorovné navzájem kolmé směry ekvivalentní hodnotu $1,17\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a ve svislém směru $0,9\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pomocí uvedených zrychlení a hmotnosti stroje jsem vypočítal potřebnou sílu, pomocí které jsem

navrhl potřebný pohon stroje a interval sil, ve kterém bude pohon pracovat. Ve svislém směru od 36 875 N do 80 663 N a vodorovném směru od 6 251 N do 8 812 N. Dále jsem stroj pevnostně zkontroloval pomocí MKP výpočtu, kde byla provedena kontrola rámu stroje, na který působí nejvyšší napětí 27,13 MPa. V závěru byla provedena kontrola na konstrukci stavby, kde napětí vyšlo 0,3 MPa. Všechny výpočty vyhovují.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D. za odborné vedení při zpracování této práce.

6 Zdroje

- 1 – US Geological Survey [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: <http://www.usgs.gov/>
- 2 - Zemětřesení. *Přírodovědecká fakulta MUNI* [online]. [cit. 17. 4. 2019] Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/~herber/quake.htm>
- 3 – Polychem Systems. *Vlastnosti materiálu* [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: www.polychem-systems.com.pl
- 4 - Zemětřesení – Wikipedie. [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zem%C4%9Bt%C5%99esen%C3%AD>
- 5 - Two way satellite internet | High speed broadband C/Ku-band connection. *Two way satellite internet | High speed broadband C/Ku-band connection* [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: <http://www.lamit.ro/>
- 6 - Základy odporové tenzometrie - ppt stáhnout. *SlidePlayer - Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. Copyright © 2019 SlidePlayer.cz Inc. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12090281/>
- 7 - Wheatstoneův můstek – Wikipedie. [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Wheatstone%C5%AFv_m%C5%AFstek
- 8 - [online]. Copyright © 2019 TRIPOMATIC S.R.O. ALL RIGHTS RESERVED [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://travel.sygic.com/cs/poi/zemetreseni-v-kobe-poi:58692>
- 9 - Magnitudo – Wikipedie. [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnitudo>
- 10 - BBCCzech.com | Svět | Zemětřesení v Kašmíru zničilo 15 tisíc vesnic. *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: http://www.bbc.co.uk/czech/worldnews/story/2005/10/051017_pakistan_quake_1845.shtml
- 11 - Nepál dva roky po ničivém zemětřesení: beznaděj v domech z plechu, ale taky návrat turistů - Aktuálně.cz. *Zprávy - Aktuálně.cz* [online]. Copyright © Economia, a.s. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/zahranici/nepal/r~0c73699a298811e7b494002590604f2e/>

- 12 - Profesionalista w przemyśle poliuretanów - Polychem Systems Sp. z o.o.. *Profesjonalista w przemyśle poliuretanów - Polychem Systems Sp. z o.o.* [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.polychem-systems.com.pl>
- 13 - Základní pojmy - Zemětřesení. [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/zemetreseni01/zakladni_pojmy
- 14 - Intenzita zemětřesení - Zemětřesení. [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/zemetreseni01/intenzita>
- 15 - MGS Online, Maryland Geological Survey's Internet Home [online]. Copyright © 2019 Maryland Geological Survey [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.mgs.md.gov/esic/brochures/gif/eqfig2.jpg>
- 16 - KUKAL, Z. *Přírodní katastrofy*, 1983. Praha 1983, 2. vyd., 259.
- 17 - Seismické vlny - Zemětřesení. [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: https://sites.google.com/site/zemetreseni01/seismicke_vlny
- 18 - Seismograf - Vlnění. *Vlnění - Vlnění* [online]. [cit. 19. 5. 2019] Dostupné z: <https://vlneni.wgz.cz/rubriky/seismograf>
- 19 – MAŠÍN, J. a VÁLEK, R. *Přehled užití geofyziky pro geology*. Praha: SPN, 1963 (Svoboda 4) — 307.
- 20 - Dome Houses of Japan: Made of Earthquake-Resistant Styrofoam - Blog. *Blog - Real Estate Japan Resources* [online]. Copyright © 2019 Real Estate Japan Inc. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://resources.realestate.co.jp/living/dome-houses-of-japan-made-of-earthquake-resistant-styrofoam/>
- 21 - Vnitřní přírodní činitelé - ppt stáhnout. *SlidePlayer - Nahrávejte a Sdílejte své PowerPoint prezentace* [online]. Copyright © 2019 SlidePlayer.cz Inc. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2856145/>
- 22 - LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*. 1977 xiv + 354 pp. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney.
- 23 - LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4., dopl. vyd.* Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 9788073610517.

24. JAN SVOBODA s.r.o., *Hydraulické válce* [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: https://www.jansvoboda.cz/files/other/k_v/V160cat-CZ01-07.pdf.

25. ČSN EN 1998-1 (730036) *Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Česká technická norma.

7 Seznam příloh

Příloha A – Sestavný výkres – DP-01